

Управление каскадным инвертором напряжения методом виртуального синхронного генератора с избирательным исключением гармоник

Р. М. Мигранов^{1*}, Н. А. Доброскок¹, Э. А. Косабийик²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

² Ташкентский университет информационных технологий имени аль-Хорезми
E-mail rmmigranov@etu.ru

Аннотация. Рассмотрено решение задачи синхронизации синхронного генератора и сетевого накопителя энергии на основе одиннадцативольного каскадного мостового инвертора, управляемого методом виртуального синхронного генератора. Для формирования напряжения на выходе сетевого накопителя энергии получено решение задачи избирательного исключения гармоник в широком диапазоне амплитуды первой гармоники. В сочетании с большим числом уровней линейного напряжения применение метода избирательного исключения гармоник позволяет как исключить необходимость применения пассивного фильтра на выходе накопителя, так и уменьшить потери силового инвертора без снижения качества напряжения. Метод виртуального синхронного генератора позволил добиться безударной синхронизации и распределения активных и реактивных составляющих нагрузок между синхронным генератором и сетевым накопителем энергии. Все выводы подтверждаются результатами математического моделирования. Метод избирательного исключения гармоник прошел верификацию на разработанном физическом прототипе однофазного каскадного инвертора.

Ключевые слова: каскадный преобразователь напряжения, избирательное исключение гармоник, виртуальный синхронный генератор, микрогрид, синхронизация

I. ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности генерации электрической энергии наряду с обеспечением высокого качества генерируемой энергии в автономных системах являются важными задачами. Долгие годы основным источником электрической энергии в таких системах являлись дизель-генераторные установки (ДГ), энергетическая эффективность которых определяется профилем нагрузки. Часто мощность ДГ выбирают по максимальной нагрузке, соответствующей, например, пусковым режимам. При этом большую часть времени ДГ работает в долевых режимах, соответствующим сниженному КПД. Повышение КПД возможно за счет применения накопителя энергии, включенного через статический преобразователь и позволяющего рассчитывать мощность ДГ по длительной нагрузке за

счет покрытия пиков энергопотребления накопителем. Применение двух разнородных источников электрической энергии позволяет обеспечить выравнивание профиля нагрузок в сети; демпфировать кратковременные колебания активной и реактивной мощности и частоты; обеспечить бесперебойность питания собственных нужд и ответственных потребителей; повысить пределы статической и динамической устойчивости [1]. Реализация функций требует разработки (совершенствования) структур статических преобразователей энергии и алгоритмов управления, которые способны обеспечить устойчивую параллельную работу в динамических и статических режимах источников электрической энергии различной физической природы, обладающих существенно различными динамическими и статическими свойствами, с заданными показателями качества в условиях переменной нагрузки автономной сети.

Для синхронизации ДГ переменного тока и источника постоянного тока, включенного через статический преобразователь, применяют алгоритмы, которые можно разделить по следующим основным направлениям:

1. Применение накопленного опыта проектирования и эксплуатации автономных электростанций, содержащих два и более синхронных генераторов (СГ). В рамках этого подхода в 2007 году авторами Н.-Р. Beck и R. Nesse [2] был предложен способ управления статическим преобразователем таким образом, чтобы его динамические и статические характеристики имитировали работу СГ. Этот способ управления статическим преобразователем основан на введенном ими понятии «виртуальный синхронный генератор» (ВСГ). Данный подход нашел свое развитие в трудах многих зарубежных ученых и научных групп, в том числе научных групп под руководством F. Blaabjerg [3].

2. Развитие способа управления статическим преобразователем, основанном на имитировании динамических и статических свойств электромеханических генераторов энергии. В рамках данного направления Josep M. Guerrero и Saeed Golestan [4] предложен подход, при котором в качестве эталонного электромеханического преобразователя энергии выступает не синхронная, а асинхронная машина. Такой подход получил в англоязычной литературе название «inducverters». Этот подход по сравнению с первым способом позволяет осуществить самосинхронизацию выходного напряжения

Исследование, приведенное в статье, выполнено в рамках выполнения НИР "РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ СТРУКТУР И БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МАСШТАБИРУЕМЫХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ (СП-4/2023/1)" (Регистрационный номер: 123062600025-3), выполняемых в рамках реализации программы стратегического академического лидерства программы "Приоритет 2030" в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете.

автономного инвертора напряжения с сетью без использования устройств фазовой автоподстройки частоты.

3. Группа методов, основанная на использовании различных модификаций фазовой автоподстройки частоты и являющаяся одним из наиболее популярных подходов к синхронизации сети переменного тока и источника постоянного тока, включенного через статический преобразователь. Методы отличаются способами реализации устройства фазовой автоподстройки частоты, основанными на использовании различного математического аппарата, включая координатные преобразования измеряемых величин, методы пространства состояний и др. Общим недостатком для этой группы методов является высокая ресурсоемкость вычислений и наличие относительно большой величины запаздывания, связанного с необходимостью определения мгновенного значения частоты и фазы синхронизируемых напряжений.

4. Группа методов, основанная на применении резонансных эффектов. В этой группе методов можно выделить работы ученых под руководством Mochammad Fata [5], Yong Kang [6], использующих линейные осцилляторы (пропорционально-резонансные регуляторы), и Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez [7], использующих нелинейные осцилляторы (например, осциллятор Хопфа). Применение осцилляторов позволяет существенно уменьшить количество вычислений, а наличие резонансных эффектов ускоряет переходные процессы.

В статье предлагается использовать улучшенный метод ВСГ. При этом в качестве статического преобразователя энергии применять каскадный инвертор, содержащий в звене постоянного тока отдельной мостовой ячейки аккумуляторный накопитель энергии. Применение такого вида статического преобразователя позволяет с одной стороны перейти к концепции распределенной аккумуляторной батареи (с программно-аппаратной реализацией методов активной балансировки аккумуляторных ячеек), а с другой существенным образом улучшить форму выходного напряжения без применения пассивных фильтрующих устройств. При этом в случае многоуровневого каскадного преобразователя можно без ухудшения качества напряжения отказаться от использования широтно-импульсной модуляции и перейти к управлению, например, на основе избирательного исключения гармоник. Структура каскадного преобразователя с учетом предлагаемого подхода может быть преобразована к модульной [8].

В работе рассмотрены особенности создания математической модели гибридной сети с параллельной работой СГ и ВСГ на основе каскадного преобразователя. Рассмотрены вопросы построения ВСГ с предсинхронизацией, а также особенности управления каскадным преобразователем методом избирательного исключения гармоник, допускающего глубокое регулирование.

II. ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

A. Метод виртуального синхронного генератора

Достижение безударной синхронизации с СГ позволяет снизить нагрузку на элементы сети, включая

нагрузку, от перегрузок по току. Модификация метода ВСГ, использующая понятие виртуальной инерции позволяет статическому преобразователю имитировать динамическое поведение генератора переменного тока, обладающего инерцией, обусловленной вращением ротора. Существует множество подвидов данного подхода, но наиболее широко применяется метод ВСГ с предсинхронизацией [9]–[12]. Для ускорения процесса синхронизации в классическую структурную схему включаются добавка разницы фаз или синуса от разницы фаз и интегратор в местной обратной связи формируя ПИ-регулятор, тем самым не только ускоряя процесс, но и избавляя от статической ошибки в процессе регулирования. На рис. 1 приведена структурная схема метода ВСГ, формирующего сигналы задания для формирования напряжения методом избирательного исключения гармоник, где введены следующие обозначения: P_{set} , Q_{set} и P_{inv} , Q_{inv} – заданное и измеренное значения активной и реактивной составляющих мощности инвертора; J_{VSG} и K_{VSG} – виртуальный момент инерции и коэффициент амплитуды; D_p и D_q – коэффициенты демпфирования; K_{amp} и K_{cas} – согласующие коэффициенты; θ_{SG} и θ_{INV} – мгновенные значения фазы напряжения СГ и инвертора; I – интегрирующая составляющая регулятора; ω_0 и U_0 – начальные значения частоты и амплитуды; M – коэффициент модуляции.

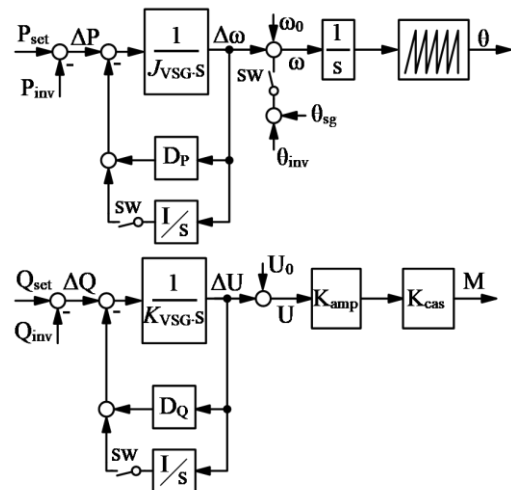


Рис. 1. Структурная схема ВСГ

На схеме элементы предсинхронизации подключены через ключ SW. На основе результатов проведенных исследований стоит отметить, что существенное влияние на вид переходных процессов оказывает разгрузка значений, накопленных на выходе интегратора после его отключения. Мгновенное отключение интеграторов приведет к высоким показателям перерегулирования во время переходного процесса в момент синхронизации.

B. Формирование напряжения методом избирательного исключения гармоник

В работе предлагается осуществлять управление каскадным преобразователем энергии методом избирательного исключения гармоник [13]–[14] на примере одиннадцатиуровневого преобразователя. Формируемое напряжение обладает четвертьволновой симметрией. В зависимости от глубины регулирования

на выходе каскадного преобразователя в работе используется один из паттернов, приведенных на рис. 2. Паттерны составляются по аналогии с [14].

Такая форма напряжения для фазы А в общем случае может быть описана через разложение в ряд Фурье.

$$u_{An} = \sum_k^{\infty} a_k \sin(k\omega t)$$

где $k \in N$ – порядок гармоник; a_k – коэффициенты разложения в ряд Фурье, который для приведенных паттернов определяется выражением:

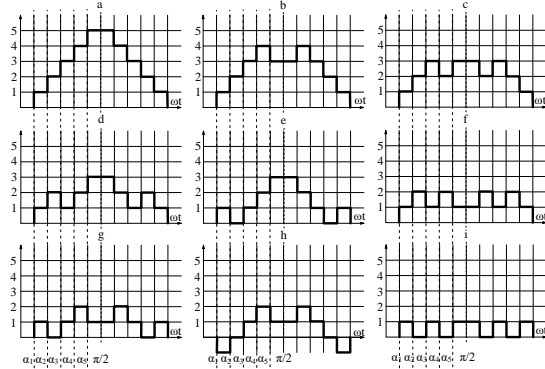


Рис. 2. Паттерны формирования напряжения

$$a_k = \frac{4U_{dc}}{\pi k} \sum_{j=1}^5 \sigma_j \cos k\alpha_j$$

где U_{dc} – напряжение в звене постоянного тока; σ – вектор коэффициентов, принимающих значения $\sigma_j = \pm 1$ в зависимости от формы напряжения и однозначно определяющий каждый паттерн; α_j – вычисляемые моменты переключения формы напряжения.

В случае 5 переключений на четверти формируемого напряжения можно управлять амплитудой первой гармоники и исключить 4 высших гармоники. Для этого необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^5 \sigma_j \cos \alpha_j - M = 0; \\ \sum_{j=1}^5 \sigma_j \cos q\alpha_j = 0, q = 5, 7, 11, 13. \end{cases}$$

где M – коэффициент модуляции. Решение системы, полученное методом Ньютона–Рафсона, адаптированного к решению задачи в [15]–[16], приведено в графическом виде на рис. 3.

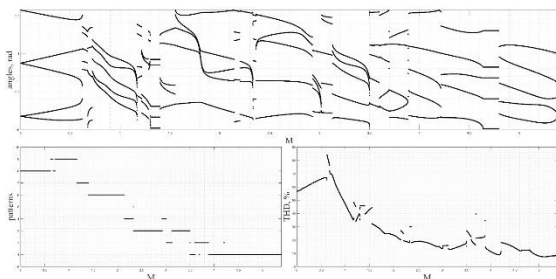


Рис. 3. Пример подписи под рисунком

Затем дополнительно поиск решений осуществлялся программой Matlab методом Trust-region. Изначально были найдены решения не для всех значений коэффициента модуляции, поэтому, во-первых, была проведена вторая итерация поиска решения, но в окрестностях уже найденных решений при меньшем шаге перебора начальных условий, во-вторых, пропуски в решениях были заменены значениями соседних решений. Тем самым были получены решения для коэффициента модуляции в диапазоне от 0.001 до 5.387. Ввиду существенной зависимости сходимости задачи поиска решений задачи исключения гармоник численными методами от начальных условий, в литературе предложены альтернативные методы решения задачи как аналитические, так и численные оптимизационные алгоритмы, например, [17]–[18] и др.

III. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

A. Описание математической модели

Основной средой разработки математической модели системы малой распределенной энергетики для исследования процесса синхронизации и распределения мощности между СГ и ВСГ был выбран пакет программ Matlab&Simulink. На рис. 4–7 представлена реализация метода ВСГ: на рис. 4 показано как осуществляется расчет момента синхронизации методом точной синхронизации; на рис. 5 – реализация разгрузки накопленных значений на выходе интегратора; на рис. 6 – измерительные блоки напряжения и мощности СГ и ВСГ; на рис. 7 – реализация структурной схемы алгоритма ВСГ, представленной ранее на рис. 1.

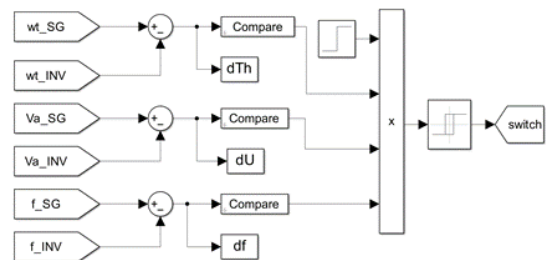


Рис. 4. Подсистема точной синхронизации

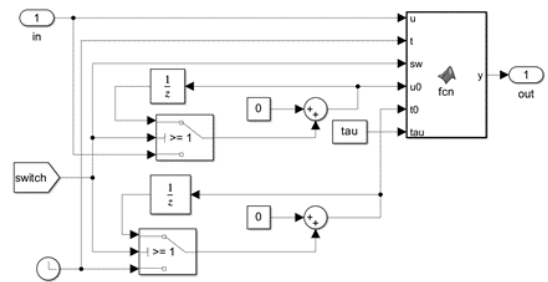


Рис. 5. Подсистема разгрузки интеграторов

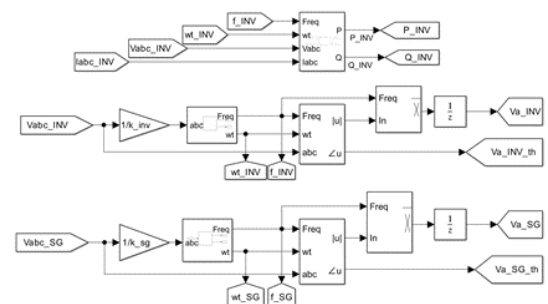


Рис. 6. Подсистема измерений

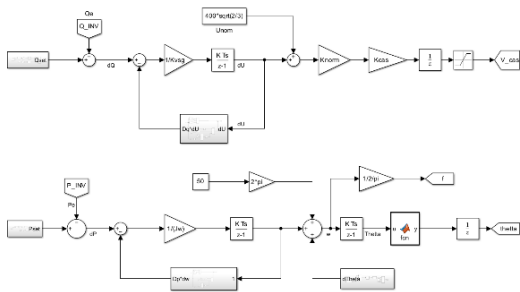


Рис. 7. Подсистема реализации метода ВСГ

Регулируемые значения амплитуды и фазы управляющего сигнала методом ВСГ необходимо, используя алгоритм избирательного исключения гармоник, преобразовать в управляющие импульсы для управления каскадным преобразователем. В работе используется одиннадцатипульсовый каскадный преобразователь. Для уменьшения количества управляющих сигналов упрощающее дальнейшую физическую реализацию применяется полномостовая схема с комплементарными парами силовых транзисторов, для управления которыми достаточно управлять только одним.

Управление силовыми транзисторами формируется по следующей последовательности: 1) по таблицам значений для требуемого значения коэффициента модуляции определяется номер паттерна и значения времени открытия ключей; 2) далее номер паттерна преобразуется в последовательность значений состояния каждого модуля; 3) соотношением состояний модулей согласно паттерну и времени открытия ключей формируются управляющие импульсы с привязкой к требуемой фазе выходного сигнала.

В. Результаты математического моделирования

Для исследования процессов синхронизации в качестве объектов были выбраны: СГ мощностью 85 кВА, 400В выходного действующего фазного напряжения, частотой 50 Гц; каскадный одиннадцатипульсовый инвертор с напряжением каждого модуля, равным 100 В; общая статическая нагрузка потребляющая 40 кВт активной мощности и 30 кВА реактивной. Модель исследуемой системы представлена на рис. 8.

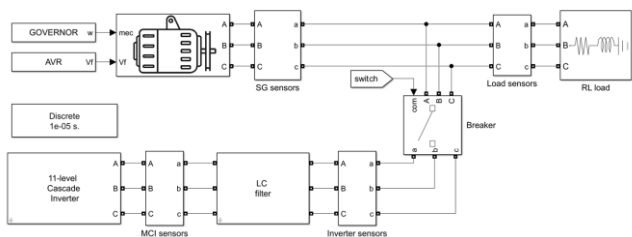


Рис. 8. Модель исследуемой системы

Приведены следующие результаты исследования: рис. 9 – спектр выходного напряжения каскадного преобразователя; рис. 10 – графики выходного напряжения СГ и ВСГ в начальный момент времени и до момента синхронизации; разница фаз и частоты, а также сравнение амплитуд основной гармоники выходного напряжения; рис. 11 – графики токов СГ и ВСГ с акцентом на моменты распределения мощности; рис. 12 – эюры активной и реактивной составляющих мощностей СГ и ВСГ.

По полученным результатам, можно сделать вывод о следующем: 1) удалось достичь безударной синхронизации и распределения мощности; 2) улучшить спектральный состав выходного напряжения.

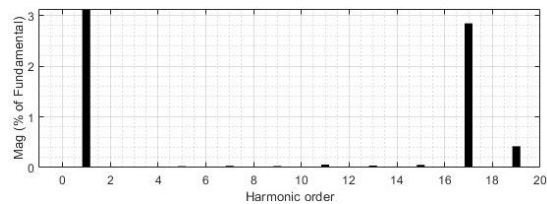


Рис. 9. Спектр выходного напряжения

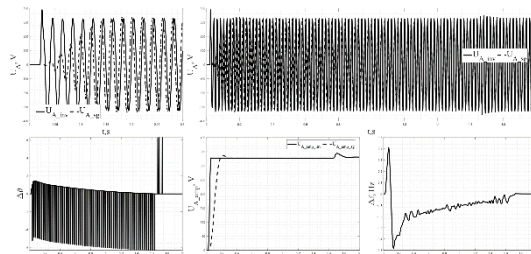


Рис. 10. Эюры выходных напряжений СГ и ВСГ, графики разницы фаз и частоты, сравнение амплитуд первой гармоники

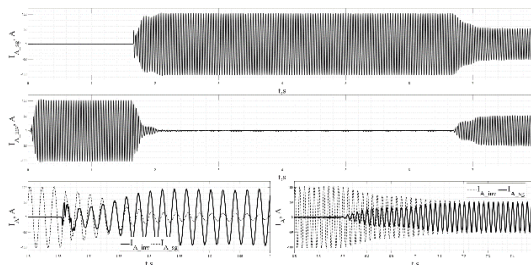


Рис. 11. Эюры выходных токов СГ и ВСГ

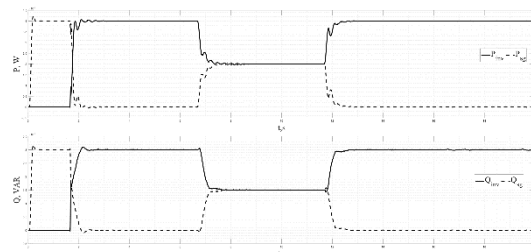


Рис. 12. Эюры активной и реактивной составляющих мощностей СГ и ВСГ

IV. РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОГО ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ

Физическая реализация исследуемой системы производится поэтапно. На настоящий момент разработана система управления одной фазой каскадного преобразователя на основе контроллера STM32, функциональная схема которой представлена на рис. 13.

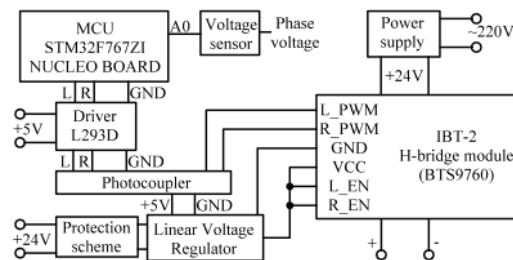


Рис. 13. Функциональная схема системы управления каскадным преобразователем

Учитывая ограничения по выходному току микроконтроллеров stm32, потребовалось использование платы усиления на основе драйверов L293D. Далее для защиты контроллера управление осуществляется посредством использования оптопар для гальванической развязки. Дополнительно разработана система защиты по перенапряжению одного модуля. В качестве силового модуля был использован модуль IBT-2.

Внешний вид однофазного макета представлен на рис. 14, а полученная эпо́ра и спектр выходного напряжения на рис. 15 и 16, соответственно, подтверждающие работоспособность алгоритма.

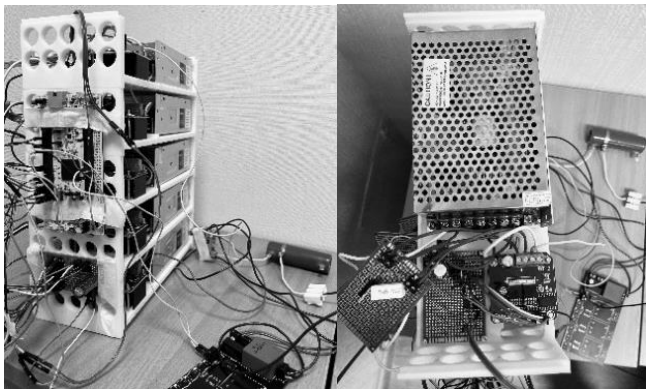


Рис. 14. Вид спереди и сверху физического макета

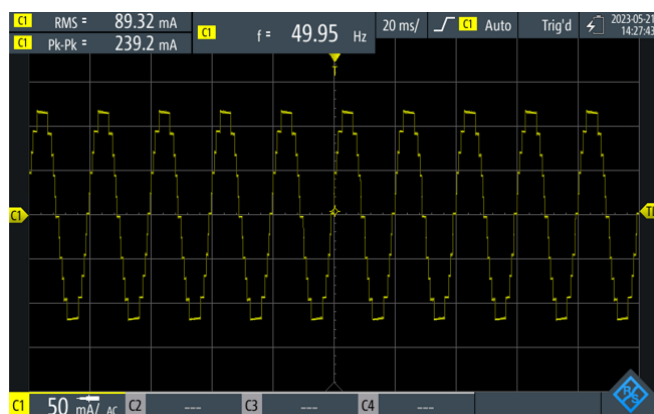


Рис. 15. Выходное напряжение каскадного инвертора

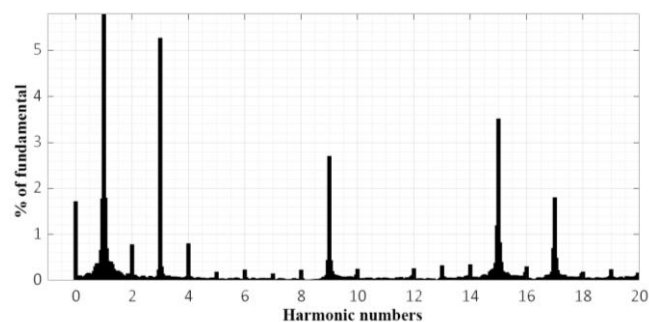


Рис. 16. Спектр выходного напряжения каскадного инвертора

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования процессов синхронизации и распределения мощности между СГ и ВСГ в системе малой распределенной энергетики был достигнут монотонной характер процессов и значительное уменьшение перерегулирования и перегрузки по току.

Применение преобразователя каскадной структуры, управляемого методом избирательного исключения гармоник, улучшило спектральный состава выходного напряжения ВСГ, что позволяет уменьшить номиналы фильтрующих устройств. Дальнейшее увеличение модулей преобразователя может позволить отказаться от пассивных фильтров, а также реализовать алгоритмы активной балансировки заряда электрохимических накопителей.

На разработанном физическом макете была проведена верификация метода избирательного исключения гармоник.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Р.Н. Бердников, В.Е. Фортов, Э.Е. Сон [и др.] // Энергия единой сети. 2013. № 2(7). С. 40-51
- [2] H. -P. Beck and R. Hesse, "Virtual synchronous machine," 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona, Spain, pp. 1-6, doi:10.1109/EPQU.2007.4424220.
- [3] K. Shi, W. Song, H. Ge, P. Xu, Y. Yang and F. Blaabjerg, "Transient Analysis of Microgrids With Parallel Synchronous Generators and Virtual Synchronous Generators," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 1, pp. 95-105, March 2020, doi: 10.1109/TEC.2019.2943888.
- [4] M. Ashabani, F.D. Freijedo, S. Golestan and J.M. Guerrero, "Inducverters: PLL-Less Converters With Auto-Synchronization and Emulated Inertia Capability," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 3, pp. 1660-1674, May 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2468600.
- [5] A.H. Kuspranoto, S.J.A. Achmad, I. Setiawan and M. Facta, "Design and Development of Injection Current Control On Inverter-Based Proportional Resonant Method," 2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang, Indonesia, 2018, pp. 191-196, doi: 10.1109/ICITACEE.2018.8576919.
- [6] Fangrui Liu, A.I. Maswood, Yong Kang, Yu Zhang and Shanxu Duan, "Proportional-resonant current control for three-phase three-level rectifier," 2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Singapore, 2007, pp. 1018-1022.
- [7] M. Li, Y. Gui, Y. Guan, J. Matas, J.M. Guerrero and J.C. Vasquez, "Inverter Parallelization for an Islanded Microgrid Using the Hopf Oscillator Controller Approach With Self-Synchronization Capabilities," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 11, pp. 10879-10889, Nov. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3031520.
- [8] M.A. Perez, S. Ceballos, G. Konstantinou, J. Pou and R.P. Aguilera, "Modular Multilevel Converters: Recent Achievements and Challenges," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 2, pp. 224-239, 2021, doi: 10.1109/OJIES.2021.3060791.
- [9] J. Wu, F. Zhuo, Z. Wang, H. Yi and K. Yu, "Presynchronization method for grid-connection of virtual synchronous generators based micro-grids," 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017, pp. P.1-P.8, DOI: 10.23919/EPE17ECCEurope.2017.8099309.
- [10] P. Xing, X. Jia, C. Tian, Y. Mao, L. Yu and X. Jiang, "Pre-synchronization Control Method of Virtual Synchronous Generator with Alterable Inertia," 2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2019, pp. 142-146, DOI: 10.1109/PEDG.2019.8807766.
- [11] Chen, Xuhai & Zhang, Yiwang & Dong, Jiqing & Mao, Xingkui & Chen, Jiaqiao & Wen, Buyin & Zhang, Zhe. (2020). A Novel Pre-Synchronization Control for Grid Connection of Virtual Synchronous Generator. Elektronika ir Elektrotechnika. 26. 25-31. 10.5755/j01.eie.26.6.25874.
- [12] Zhou, Zifu & Long, Jun. (2020). An improved grid-connected pre-synchronization method for photovoltaic micro-grid. Journal of Physics: Conference Series. 1549. 052040. 10.1088/1742-6596/1549/5/052040.
- [13] Eryong Guan, Pinggang Song, Manyuan Ye and Bin Wu, "Selective Harmonic Elimination Techniques for Multilevel Cascaded H-Bridge Inverters," 2005 International Conference on Power Electronics and

- Drives Systems, 2005, pp. 1441-1446, doi: 10.1109/PEDS.2005.1619915.
- [14] K. Yang et al., "Unified Selective Harmonic Elimination for Multilevel Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 2, pp. 1579-1590, Feb. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2548080.
- [15] D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo. Pulse width modulation for power converters: Principles and Practice. USA: Wiley-IEEE Press, 2003. P. 734.
- [16] T. Mistry, S.K. Bhatta, A.K. Senapati and A. Agarwal, "Performance improvement of induction motor by Selective Harmonic Elimination (SHE) using Newton Raphson (N-R) method," 2015 International Conference on Energy Systems and Applications, Pune, India, 2015, pp. 364-369, doi: 10.1109/ICESA.2015.7503372.
- [17] K. Yang, Q. Zhang, R. Yuan, W. Yu, J. Yuan and J. Wang, "Selective Harmonic Elimination With Groebner Bases and Symmetric Polynomials," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 4, pp. 2742-2752, April 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2447555.
- [18] M. Sadoughi, A. Zakerian, A. Pourdashnia and M. Farhadi-Kangarlu, "Selective Harmonic Elimination PWM for Cascaded H-bridge Multilevel Inverter with Wide Output Voltage Range Using PSO Algorithm," 2021 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), College Station, TX, USA, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/TPEC51183.2021.93849